

УДК 625.72
UDC 625.72

DOI: 10.33744/0365-8171-2023-113.1-041-046

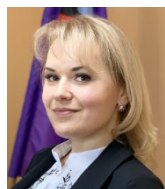
**ТРАНСПОРТНА БЕЗПЕКА: РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ
БЕЗПЕКИ ДОРОЖНЬОГО РУХУ В ЩІЛЬНИХ ПОТОКАХ**

**TRANSPORT SAFETY: DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR IMPROVING
ROAD TRAFFIC SAFETY IN DENSE FLOWS**



Гусєв Олександр Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Транспортні технології», Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: alex.2017.tu@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0420-0443>



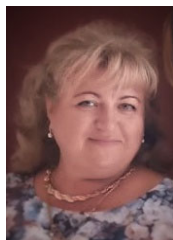
Гальона Інеса Іванівна, кандидат технічних наук, кандидат юридичних наук доцент кафедри «Транспортні технології», Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: ntu.tt.inesa@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1484-1682>



Федоренко Ірина Олександрівна, аспірант, асистент кафедри «Транспортні технології», Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: levytska12332@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8690-5673>



Герасименко Алла Володимирівна, старший викладач кафедри «Аеропорти», Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: a.gerasimenko@yandex.ua

<https://orcid.org/0000-0001-7038-3703>

Анотація. Наукові дослідження та практика автотехнічної експертизи свідчать про те, що до 80 % всіх ДТП виникають з вини водія. В багатьох випадках основною причиною ДТП є недотримання водієм безпечної дистанції руху, що унеможливило своєчасну реакцію на виникнення небезпечних ситуацій. Це також стосується усіх типових небезпечних дорожньо-транспортних ситуацій. В той же час, в більшості випадків існує початковий період часу, протягом якого водій має можливість уникнути ДТП, вибравши безпечну швидкість руху або зупинивши автомобіль. Оскільки рухаючись у транспортному потоці (особливо в режимі зв'язаного руху) водій часто обмежений у виборі швидкості, але може вільно вибирати дистанцію, проблема вибору безпечної швидкості руху (БШР) безпосередньо пов'язана з проблемою вибору безпечної дистанції слідування (БДС). Тому в умовах руху автомобіля в щільному потоці тільки від рівня підготовки водія залежить чи буде безпечним вибраний ним інтервал слідування. У статті розглянуті підходи, принципи та алгоритми розробки інноваційних заходів щодо підвищення безпеки дорожнього руху в щільних потоках з використанням

теорії системного аналізу та теорії ймовірності. здійснений аналіз умов руху в потоці дозволяє встановити зв'язок між середнім інтервалом руху і безпечними інтервалами слідування зв'язних та вільних ТЗ. Результати представлені авторами залежності дозволяють сформулювати рекомендації для водіїв, що рухаються в потоці. Розроблені вимоги та рекомендації щодо забезпечення безпеки руху, зокрема, в щільних потоках. Отримані результати та математичні залежності дозволяють розробити рекомендації щодо розташування технічних засобів регулювання дорожнього руху тощо. Сформульовані рекомендації щодо перспективних подальших наукових досліджень, що будуть спрямовані як на підвищення безпеки руху у щільних потоках так і розробки заходів регулювання дорожнього руху. Як окрема рекомендація, результати можуть бути застосовані для проектування системи заходів щодо безпеки руху громадського (пасажирського) транспорту та удосконалення технологій пасажирських перевезень.

Ключові слова: щільні потоки, безпека дорожнього руху, безпечної дистанції слідування, щільність розподілу часових інтервалів руху.

Постановка проблеми. За світовими статистичними даними від 70 % до 80 % усіх ДТП [1, 2] виникають з вини водіїв. Аналіз причин аварійності і практика автотехнічної експертизи показують, що в більшості випадків існує початковий період часу, протягом якого водій має можливість уникнути ДТП, вибравши безпечну швидкість руху або зупинивши автомобіль [2, 3, 4, 5]. Оскільки рухаючись у транспортному потоці (особливо в режимі зв'язаного руху) водій часто обмежений у виборі швидкості, але може вільно вибирати дистанцію, проблема вибору безпечної швидкості руху (БШР) безпосередньо пов'язана з проблемою вибору безпечної дистанції слідування (БДС). Тому в умовах руху автомобіля в щільному потоці тільки від рівня підготовки водія залежить чи буде безпечним вибраний ним інтервал слідування.

Аналіз попередніх досліджень та публікацій

Визначенням динамічного габариту та дистанції слідування займалися Хом'як Я.В., Брайловський Н.О., Єресов В.І. та інші для цілей вивчення закономірностей та параметрів дорожнього руху, розрахунку пропускної здатності дороги тощо. Також сучасні закордонні дослідження, пов'язані із безпекою дорожнього руху в щільних потоках слід виконували YuYu Zhu, QingE Wu, Na Xiao [6], Rodriguez M., Fathy H. [7], Junwei Z. [8], Tajdari, F. & Roncoli, C. [9] тощо.

В той же час, питання забезпечення безпеки руху за рахунок встановлення водієм БДС, врахування психофізіологічних параметрів водіїв, рівня профмайстерності тощо не вивчалися. Ці аспекти не досліджені, не систематизовані та не формалізовані у математичному вигляді та потребують, за думкою авторів цього дослідження,

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є забезпечення підвищення транспортної безпеки та безпеки дорожнього руху в щільних потоках за рахунок створення математичної моделі безпечної дистанції слідування.

Завдання дослідження:

- дослідити щільність розподілу часових інтервалів руху в зв'язаних транспортних потоках;
- визначити математичне очікування інтервалу руху транспортного засобу;
- встановити зв'язок між середнім інтервалом руху і безпечними інтервалами слідування зв'язних та вільних транспортних засобів.

Основна частина дослідження

Першим етапом наукової роботи авторів щодо забезпечення безпеки дорожнього руху в щільних потоках є визначення розміру БДС для різних умов руху автомобілів на дорозі.

Аналітичний вираз динамічного габариту, одержаний для випадку термінової зупинки автомобіля, який рухається попереду (що має місце у випадку виникнення небезпечної дорожньо-транспортної ситуації (НДТС) ("гальмівний шлях") має вид:

$$S_{БДС} \geq \frac{t_p v}{3,6} + \frac{v^2 K_e}{254\phi} + \frac{t_T v}{3,6} + l_o \quad (1)$$

де t_p – час реакції водія, що включає час з моменту появи небезпечної дорожньо-транспортної ситуації (НДТС) до моменту прийняття рішення про термінове гальмування; t_T – час спрацювання гальмівного механізму автомобіля; K_e – коефіцієнт ефективності гальмівної системи автомобіля; v – швидкість руху автомобіля при виникненні НДТС; l_0 – запас шляху між автомобілями після повної зупинки ($l_0 = 1\text{ м}$); φ – коефіцієнт зчеплення колес автомобіля з поверхнею проїзної частини.

Таким чином, граничне значення БДС (при записі формули (1) у вигляді рівняння) визначається, з одного боку, швидкістю руху, коефіцієнтом зчеплення автомобіля з поверхнею проїзної частини, ефективністю та швидкістю спрацювання його гальмівної системи, з другого, – часом реакції водія, що характеризує рівень підготовленості останнього до руху в потоці і до прогнозування НДТС.

Визначення БДС за формулою (1) має сенс тільки в насичених потоках або у разі колонного руху за лідером, коли відсутня можливість обгону транспортних засобів.

Очевидно, що коли водій може довільно вибирати дистанцію руху, граничне значення БДС визначається тільки першою складовою виразу (1), тобто:

$$S_{\text{БДС}} \geq \frac{t_p v}{3,6} + l'_0, \quad (2)$$

де l'_0 – запас шляху, м, необхідний для зміни рядності руху при виконанні обгону, який залежить від швидкості руху [3]:

V, км/год	20	40	60	80	100
l'_0 , м	5	8	10	13	15

При русі у зв'язному потоці, особливо при інтенсивностях, близьких до пропускної спроможності дороги, фактичне значення БДС не відповідає визначеному за формулою (1). Так, за даними Н.О. Брайловського пропускна спроможність однорідного потоку легкових автомобілів 2000 авт/год забезпечує середню дистанцію слідування майже в 1,5 разів меншу, ніж БДС, визначена за формулою (1) при швидкості у режимі пропускної спроможності 14 м/с. Це пояснюється тим, що частина водіїв, маючи можливість здійснення обгону, витримують безпечну дистанцію згідно з (2), що й дає загальне зниження середнього інтервалу слідування залежно від можливості здійснення обгону при виникненні НДТС.

З метою встановлення зв'язку середнього інтервалу руху в потоці з безліччю БДС авторами проведено дослідження механізму руху в щільних потоках.

Щільність розподілу часових інтервалів руху в зв'язаних транспортних потоках [2, 3]:

$$f(t) = \alpha \lambda e^{-\lambda t} + (1 - \alpha) \frac{1}{2} \Omega^3 t^2 e^{-\Omega t}, \quad (3)$$

де λ – інтенсивність руху; α – зона транспортного засобу, що повільно рухається; $\Omega = a\lambda$ – параметр зв'язного потоку, приведенного до вільного (a – коефіцієнт приведення).

Значення α можна порівняти $(1 - z)$, де $z = \lambda / \lambda_{\text{max}}$ – коефіцієнт завантаження дороги; λ_{max} – пропускна спроможність дороги.

Визначимо математичне очікування інтервалу руху транспортного засобу (ТЗ) в потоці:

$$M(t) = t_{CP} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \frac{\alpha}{\lambda} + \frac{3(1 - \alpha)}{a\alpha} \quad (4)$$

З виразу (4) випливає, що при інтенсивностях руху, близьких до пропускної спроможності ($z = 0,75 \dots 0,8$), тобто при $a = 0,2 \dots 0,25$, середній інтервал руху t_{CP} практично не залежить від значення α і значною мірою визначається коефіцієнтом приведення зв'язного потоку до вільного a .

Формула (4) дозволяє за середнім значенням інтервалу руху t_{cp} і коефіцієнтом завантаження дороги z визначити коефіцієнт a , що характеризує ступінь зв'язності потоку.

Знаючи a , α та λ для конкретного потоку, можна за формулою (3) обчислити імовірність здійснення обгону P_{OB} . У загальному випадку для здійснення обгону потрібне виконання двох умов: необхідності обгону і можливості обгону. Оскільки обидві умови є випадковими, визначимо їх відповідні імовірності P_H і P_M , що дозволяє записати імовірність здійснення обгону:

$$P_{OB} = P_H P_M \quad (5)$$

Імовірність появи необхідності в обгоні впливатиме з умови досягнення водієм граничного значення $S_{БДС}$ згідно з (2), яке визначить мінімальний часовий інтервал слідування:

$$t_{OB} = \frac{S_{БДС}^{CB}}{v} \quad (6)$$

Тоді, враховуючи (3):

$$P_M = \int_{t_{OB}}^{\infty} [\alpha_{ПП} \lambda_{ПП} \cdot e^{-\lambda_{ПП} t} - \frac{(1 - \alpha_{ПП}) \Omega_{ПП}^3 t^2}{2e^{-\Omega_{ПП} t}}] dt, \quad (7)$$

де індекс «ПП» відноситься по потоку, в якому рухається розглядуваний транспортний засіб. З другого боку, обгін можливий при наявності інтервалу часу t_{OB} у зустрічному потоці транспорту, достатньому для обгону, тобто:

$$P_M = \int_{t_{OB}}^{\infty} [\alpha_{OB} \lambda_{OB} \cdot e^{-\lambda_{OB} t} - \frac{(1 - \alpha_{OB}) \Omega_{OB}^3 t^2}{2e^{-\Omega_{OB} t}}] dt, \quad (8)$$

де індекс «OB» відноситься до зустрічного потоку (для дороги з двосмуговим рухом) або до потоку на сусідній смузі дороги з багатосмуговим рухом.

У загальному випадку значення $t_{об}$ залежить від швидкості руху і кількості засобів, яких було обігнано:

$$t_{OB} = \frac{2l_0 + l_a}{v_B} \quad (9)$$

де l_a – довжина ТЗ, якого обігнано (при обгоні двох ТЗ – це відстань між переднім бампером переднього та заднім бампером заднього ТЗ, що їх обігнано); v_B – відносна швидкість обгону (рекомендується $v_B > 10$ км/год).

Реальне значення t_{OB} знаходиться в межах 10...30 с [3]. В таблиці 1 показані імовірності появи обгону P_{OB} на дорозі з двосмуговим рухом при різних значеннях t_{OB} (1 – для $t_{OB} = 7$ с; 2 – для $t_{OB} = 10$ с; 3 – для $t_{OB} = 20$ с; 4 – для $t_{OB} = 30$ с).

Маючи значення a , α та λ для прямого та зустрічного потоків, можна за допомогою (5) з врахуванням (6) – (9) визначити імовірності обгонів ТЗ в прямому потоці. В свою чергу, це дозволяє визначити кількість інтервалів руху $N_{БДС}$ і $N_{БДС}^{CB}$, відповідних виразам (1) і (2), які спостерігалися протягом години, тобто:

$$T_{БДС} = \lambda_{ПП} (1 - P_{OB}), \quad (10)$$

$$N_{БДС}^{CB} = \lambda_{ПП} P_{OB}, \quad (11)$$

а також середній інтервал руху ТЗ в потоці:

$$d_{CP} = \frac{S_{БДС} N_{БДС} + S_{БДС}^{CB} N_{БДС}^{CB}}{N_{БДС} + N_{БДС}^{CB}} \quad (12)$$

Таблиця 1 – Розрахункові імовірності появи можливості обгону залежно від інтенсивності транспортного потоку N на дорозі з двосмуговим рухом

Table 1 – Estimated probabilities of an overtaking opportunity depending on the intensity of traffic flow N on a two-lane road

N, авт/год	P_M			
	$t_{об}, c$			
	7	10	20	30
100	0,33	0,29	0,18	0,1
300	0,15	0,11	0,05	0,02
500	0,07	0,05	0,03	0,01

Висновки. Таким чином, здійснений аналіз умов руху в потоці дозволяє встановити зв'язок між середнім інтервалом руху і безпечними інтервалами слідування зв'язних та вільних ТЗ.

Одержані авторами результати та математичні залежності дозволяють:

1. сформулювати рекомендації для водіїв, що рухаються в потоці (зокрема, для водіїв пасажирського транспорту);
2. розробити вимоги та рекомендації щодо забезпечення безпеки руху, зокрема, в щільних потоках;
3. обґрунтувати рекомендації щодо розташування технічних засобів регулювання дорожнього руху;
4. сформулювати рекомендації щодо перспективних подальших наукових досліджень, що будуть спрямовані як на підвищення безпеки руху у щільних потоках так і розробки заходів регулювання дорожнього руху.

Перелік посилань

1. WHO World Road Accidents Statistics Data. – Geneva: WHO, 2015. – 423 p.
2. Gusev O.V. Improving the road transport safety / O.V. Gusev // Visnyk NTU. 2004. No. 9. P. 98 – 103. (Engl.)
3. Gusev A.V. The development of prediction models / A.V. Gusev //Highways and highway construction, #7, Kiev, NTU, 2004. – P. 77–79.
4. Гусєв О.В. Підвищення безпеки руху автомобільного транспорту з урахуванням ефективності зорових дій водія./ О.В.Гусєв // Автореф. дис. канд.техн.наук. – К.: УТУ, 1995. – 21 с.
5. Гусєв О.В. Забезпечення зберігання та безпеки вантажів на транспорті: [учбовий посібник] / О.В. Гусєв. – К.: НТУ, 2005. – 156 с.
6. Yuyu Zhu, QingE Wu, Na Xiao Research on highway traffic flow prediction model and decision-making method / <https://www.nature.com/articles/s41598-022-24469-y>.
7. Rodriguez M., Fathy H. Vehicle and traffic light control through gradient-based coordination and control barrier function safety regulation. J. Dyn. Syst. Meas. Contr. 144(01), 1104–1115 (2022).
8. Junwei Z. et al. Expressway traffic flow under the combined bottleneck of accident and on-ramp in framework of Kerner's three-phase traffic theory. Phys. A 574(4), 1–11 (2021).
9. Tajdari F., Roncoli C. Traffic control at motorway bottlenecks with time-varying fundamental diagram. IFAC-Pap. OnLine 54(02), 271–277 (2021).

TRANSPORT SAFETY: DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR IMPROVING ROAD TRAFFIC SAFETY IN DENSE FLOWS

Gusiev Oleksandr V., Ph.D., Associate Professor, Department of Transport Technologies, National Transport University, Kyiv, Ukraine, *e-mail:* alex.2017.tu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0420-0443>

Halona Inesa I., candidate of technical sciences, candidate of legal sciences, associate professor of the "Transport Technologies" department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, *e-mail:* ntu.tt.inesa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1484-1682>

Fedorenko Iryna O., postgraduate student, Department of Transport Technologies, National Transport University, Kyiv, Ukraine, *e-mail:* levytska12332@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8690-5673>

Gerasimenko Alla V., Senior Lecturer of the department "Airports", National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: a_gerasimenko@yandex.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7038-3703>

Abstract. Scientific research and the practice of auto technical expertise show that up to 80% of all road accidents are caused by the faults of the driver. In many cases, the main cause of road accidents is the driver's failure to maintain a safe driving distance, which makes it impossible to react in a timely manner to the occurrence of dangerous situations. This also applies to all typical dangerous traffic situations. At the same time, in most cases there is an initial period of time during which the driver has the opportunity to avoid an accident by choosing a safe speed or stopping the car. Since when moving in the traffic flow (especially in the mode of connected traffic) the driver is often limited in the choice of speed, but can freely choose the distance, the problem of choosing a safe speed of movement (BSHR) is directly related to the problem of choosing a safe following distance (SFD). Therefore, in the conditions of driving a car in a dense flow, only the level of training of the driver depends on whether the following interval chosen by him will be safe. The article examines approaches, principles and algorithms for the development of innovative measures to improve traffic safety in dense traffic using the theory of system analysis and the theory of probability. The performed analysis of traffic conditions in the stream allows establishing a connection between the average movement interval and safe intervals for following connected and free vehicles. The results presented by the authors of the dependence allow for the formulation of recommendations for drivers moving in the flow. Developed requirements and recommendations for ensuring traffic safety, in particular, in dense streams. The obtained results and mathematical dependencies make it possible to develop recommendations regarding the location of technical means of traffic regulation, etc. Recommendations for promising further scientific research aimed at increasing the safety of traffic in dense streams and the development of traffic regulation measures have been formulated. As a separate recommendation, the results can be applied to the design of a system of measures for the safety of public (passenger) transport and improvement of passenger transport technologies.

Keywords: dense flows, road traffic safety, safe following distance, density of distribution of traffic time intervals.

References

1. WHO World Road Accidents Statistics Data. – Geneva: WHO, 2015. – 423 p.
2. Gusev O.V. Improving the road transport safety / O.V. Gusev // *Visnyk NTU*. 2004. No. 9. P. 98 – 103. (Engl.)
3. Gusev A.V. The development of prediction models / A.V. Gusev // *Highways and highway construction*, #7, Kiev, NTU, 2004. – P. 77–79.
4. Gusiev O.V. Advancement of the safety of road transport with the improvement of the efficiency of wild water. / O.V. Gusev // Abstract of the thesis. dis. Candidate of Technical Sciences - K. : UTU, 1995. - 21 p. [in Ukrainian language].
5. Gusiev O.V. Safety and security of interests in transport: [textbook] / O.V. Gusev. – K.: NTU, 2005. – 156 p. [in Ukrainian language].
6. Yuyu Zhu, QingE Wu, Na Xiao Research on highway traffic flow prediction model and decision-making method / <https://www.nature.com/articles/s41598-022-24469-y>.
7. Rodriguez M., Fathy H. Vehicle and traffic light control through gradient-based coordination and control barrier function safety regulation. *J. Dyn. Syst. Meas. Contr.* 144(01), 1104–1115 (2022).
8. Junwei Z. et al. Expressway traffic flow under the combined bottleneck of accident and on-ramp in framework of Kerner's three-phase traffic theory. *Phys. A* 574(4), 1–11 (2021).
9. Tajdari F., Roncoli C. Traffic control at motorway bottlenecks with time-varying fundamental diagram. *IFAC-Pap. OnLine* 54(02), 271–277 (2021).